

鉄筋コンクリート充填鋼管構造の力学的特性に関する 解析的および実験的研究

阿 里 甫 江

要 旨

近年、自然災害として大地震が発生し、多くの構造物を崩壊させ、多くの人命や財産を失わせている。もっと安全で安心できる生活環境を提供するためには、構造物の耐震性をより強化する必要があり、耐震構造に関する研究や検討が恒久的な課題になっている。また、スペースが限られている都市空間では、都市空間に張り巡らされた高架橋などの構造物のコンパクト化による空間利用の多角化が期待されている。さらに、人類社会の発展に伴う、大規模な構造物や超長大橋などの需要に応えるための構造物の開発が必要となっている。これらに対応するためには、強度、変形性能およびエネルギー吸収能力をより高く有する優れた構造部材の誕生が期待されている。

コンクリート充填鋼管構造 (CFT) は、高い強度、変形性能および大きなエネルギー吸収能力など優れた耐震性能を持つため、大きな荷重を指示する構造部材として、様々な建設工事で使用されている。この CFT に鉄筋を入れた、鉄筋コンクリート充填鋼管構造 (RCFT) は、CFT のメリットに鉄筋コンクリート構造 (RC) の特性を融合させることを目的として開発された構造である。

これまで、RCFT に関するいくつかの研究が行われているが、それらは CFT と比較した RCFT の基本的な力学的性能を実験的に調査した研究で、RCFT を構成する材料の詳細な特性、特に鋼管厚、コンクリート強度、軸方向鉄筋量など、RCFT 部材の設計に必要とする研究成果が、まだ解明されていない。また、軸圧縮力および曲げ耐力の評価式についても、鉄筋の評価など不十分な点が多くあり、改善が必要とされている。

したがって、解析と実験の両方の手法を使用して、主に鋼管厚とコンクリート強度から求まる RCFT の鋼材荷重分担率および軸方向鉄筋比による軸圧縮と曲げを受ける RCFT 部材の力学的特性の詳細を明らかにした。また、それぞれの耐力評価に鉄筋の評価を取り入れた新しい評価式を提案し、検証した。

そこで、本研究は下記のように進められた：

- (1) 有限要素 (FE) ソフトウェア ADINA を用いて、RCFT の数値シミュレーション方法を研究した。その結果、コンクリートコア、鋼管、鉄筋及びコンクリートと鋼管の接触などの数値モデルが明らかにされ、実験結果と整合性を確認し、RCFT に適用できる有効で信頼性の高い数値解析手法を提案した。

学位記番号と学位：博第 51 号，博士（工学）

授与年月日：平成 25 年 3 月 19 日

- (2) RCFT の効果的な利用を考慮し、薄肉鋼管と高強度コンクリートで作られた荷重分担比率の低い RCFT の圧縮試験を行った。この圧縮試験によって、等厚の鋼管では CFT より RCFT がより良い強度、変形性能およびエネルギー吸収能力のパフォーマンスが得られることが明らかになった。このため、パフォーマンスを低下させずに、RCFT では CFT より薄肉の鋼管を使用することが可能と考えられ、経済的な大規模構造に適用する可能性を見いだし、実験結果に基づき、RCFT の荷重分担比率の範囲とその評価方法について数値パラメトリック研究を行い、荷重分担比率に関して、 $0.1 \leq \gamma_s \leq 0.9$ と有効な範囲と新しい計算式をそれぞれ提案した。提案された有効範囲に基づき、RCFT の適切な力学的性能を達成できる最適な荷重分担比率範囲が $0.3 \leq \gamma_s \leq 0.5$ と示された。さらに、大きな寸法の RCFT の解析結果から、提案した範囲が実際の RCFT 構築物に適用が可能であることを検証した。
- (3) 軸方向鉄筋の効果に関する実験的研究を行った。実験結果によって、軸方向鉄筋は、RCFT の軸圧縮パフォーマンスに直接影響を及ぼすことを明らかにした。適切な鉄筋比の使用は、RCFT の延性、靱性および拘束効果を増加させ、全体的なパフォーマンスを向上させることができる。言い換えれば、RCFT をより優れた力学的パフォーマンスを示す軸鉄筋の最適な鉄筋比が存在することを意味する。その最適な鉄筋比を見い出すために、様々な鉄筋比と鋼管の厚さによる数値パラメトリック研究を行った。その結果、様々な厚さの鋼管に適用できる軸方向鉄筋比の最適な範囲が $1.5\% \leq \rho_s \leq 3.0\%$ と提案した。
- (4) 軸方向鉄筋を考慮した軸圧縮強度の評価式を提案するために、RCFT の軸圧縮挙動に関する数値パラメトリック解析を行い、荷重分担比率と関連している拘束効果の評価式を提案した。また、拘束効果、破壊モード及びせん断破壊のメカニズムを明らかにするとともに、得られた成果に基づき、RCFT の終局軸圧縮強度の評価式を提案した。実験結果および大きなサイズの RCFT の解析に対する検証の結果、提案された評価式の妥当性を確認し、任意サイズの RCFT に適用することができることを解明した。
- (5) RCFT の曲げ挙動に関する数値解析的研究を実施した。その結果、軸圧縮力に対して提案された荷重分担率と鉄筋比の最適な範囲（それぞれ $0.3 \leq \gamma_s \leq 0.5$ と $1.5\% \leq \rho_s \leq 3.0\%$ ）が曲げを受ける RCFT にも適用できることを解明した。また、軸方向鉄筋が RCFT の中立軸に重大な影響があるのを確認し、それに関して、鉄筋の影響を考慮している RCFT の中立軸の位置の評価式と終局曲げ耐力の評価式を提案した。さらに、圧縮と曲げ荷重、繰り返し荷重およびせん断荷重を受ける RCFT の数値解析をそれぞれ行い、RCFT の耐震挙動を CFT のそれと比較しながら研究した。その結果、鉄筋の重要な役割と RCFT は常に CFT より良い耐震性能を持つことを解明した。

この研究では、RCFT が高い強度、変形性能および大きなエネルギー吸収能力などを持つ、厳しい耐震性能を求める巨大な構造物に適用できるより優れた構造である事を解明すると同時に、RCFT 部材の設計時に使用する各複合材料と部材全体の力学的特性および終局強度評価方法を数値解析および実験的研究によって明らかにした。これらの研究成果と提案された各評価式は、RCFT 構造の統合的な設計方針の確立に貢献でき、背景とした地震災害への安全、都市空間の活用、あるいは大規模構造物への適用を通して、社会に還元できると考えている。

主 査 長 谷 川 明

Analytical and Experimental Studies on Mechanical Characteristics of RCFT Structures

Alifujiang Xiamuxi

Abstract

To provide people safer and more comfortable living conditions, the structural works must be strong and can endure kinds of shocks like earthquake. As one of the natural disasters, a big earthquake usually causes big destructions of the constructions and big loss of human life and property. Earthquake resistant structures then are the permanent questions for study and discussion. Furthermore, to meet the increasing demands of the large-scaled structures with limited spaces in the cities or mega-structures in industrial and civil constructions, better structural elements which have high strength to bear huge loads, slenderness to spare out more effective spaces and better energy absorption capacity to endure shocks such as earthquake are keep expecting.

The Concrete Filled Tubular steel structures (CFT) have gained popularity in supporting heavy loads in construction works due to their excellent seismic event resistant structural properties such as high strength and ductility and large energy absorption capacity. As a variant of CFT, Reinforced Concrete Filled Tubular steel structures (RCFT) were then developed on the purpose of preventing the brittle-failure of concrete core of CFT by inserting the reinforcements and combining the merits of Reinforced Concrete structures (RC) and CFT. Studies have proved that the RCFT has better structural performances than CFT.

Although there have been studies on RCFT, all of them are overall performance based studies, the detailed characteristics of composite portions such as thickness of steel tube, strength of concrete core and amount of axial reinforcement which are essential in design process of RCFT are not clear yet. Furthermore, the evaluation equations for axial compression and bending strengths still have insufficiencies, which mean the evaluation equations are still lack of consideration of effect of reinforcement.

Therefore, in order to make clear the more detailed mechanical characteristics of RCFT, this research work carried out studies on load-sharing and reinforcement ratios, axial compressive and bending behaviors, and strength evaluation equations of RCFT, by the means of both analytical and experimental methods. Around this subject, studies were expanded and characteristics of RCFT were clarified in the following topics:

- (1) Numerical simulation method for RCFT was studied using Finite Element (FE) software ADINA. As results, numerical models for concrete core, steel tube, reinforcement and contact were clarified, and an effective, accurate and reliable numerical analysis method for RCFT was proposed.
- (2) Compression tests of RCFT which were made with thin-walled steel tube and high-strength concrete were carried out, and it was made clear that better performance with RCFT than CFT

can be obtained with same thickness of steel tube, and better economic effect then is expectable with RCFT by making steel tube thinner without decrease of performance compared with CFT, and hence the RCFT can be regarded as a better choice to be applied to construct large-scaled structures. Based on the results of the experiment, numerical parametric studies on ranges and evaluation methods for load-sharing ratio of RCFT then was performed. As results, a valid range as $0.1 \leq \gamma_s \leq 0.9$ and new evaluation method for load-sharing ratio of RCFT were proposed, respectively. Based on the proposed valid range, an optimal range which will enable the RCFT to achieve best balance between mechanical performance and constructional cost was proposed as $0.3 \leq \gamma_{so} \leq 0.5$. Validation results with big-sized RCFT proved that the proposed ranges are also applicable to real RCFT constructions.

- (3) Experimental studies on the effect of axial reinforcement were carried out, and it was made clear that the axial reinforcement has direct effect on the performance of RCFT subjected to axial compression. The proper ratio will enable RCFT to improve ductility, toughness, confinement effect and then overall performance, in other words, there would be the optimal ratios of axial reinforcement which would put the RCFT into better mechanical and economic conditions. Plenty of numerical parametric studies with varying ratios and thicknesses of steel tubes were then performed to make clear these optimal ratios, and an optimal range which is suitable for the ratio of axial reinforcement of RCFT with any thicknesses of steel tubes was proposed as $1.5\% \leq \rho_o \leq 3.0\%$.
- (4) Numerical parametric studies on axial compressive behaviors of RCFT were carried out. As results, a none-conventional method and empirical equations which were related with the load-sharing ratio of RCFT were proposed to evaluate the confinement effects. Furthermore, the acting rule of the confinement effect, the failure mode and the mechanism of the shear-failure were also clarified. Based on the obtained results, an evaluation equation for ultimate axial compressive strength of RCFT was proposed. Plenty of validations against experiments and analytical results of big-sized RCFT proved that the proposed equations are reliable and can be applicable to RCFT in any size.
- (5) Numerical studies on bending behaviors of RCFT were conducted. The analytical results with bending proved that the optimal ranges for both load-sharing and reinforcement ratios proposed in this study (say $0.3 \leq \gamma_{so} \leq 0.5$ and $1.5\% \leq \rho_o \leq 3.0\%$, respectively) can be applied to the RCFT subjected to both compression and bending. Furthermore, it was made clear that the axial reinforcement has significant effect on the neutral axis of RCFT. An empirical equation to evaluate the position of neutral axis of RCFT and an equation in which the effect of axial reinforcement is considered for the ultimate bending strength of RCFT was then proposed. At the end, the bending with compression, the hysteresis and the shear performances which account for the seismic behaviors of RCFT were analyzed by the means of comparative numerical studies against CFT, and it was further made clear that the effect of reinforcement is significant, and the RCFT has better seismic performance than CFT.

In conclusion, this research work have tried to make clear the mechanical characteristics of each

composite portion and whole member and strength evaluation methods of RCFT which are essential to be understood from start to end of designing process of RCFT members, by the means of both analytical and experimental studies. The study results and proposals of this research work will be a little contribution to formation of an integrated design method for RCFT structures, development of anti-seismic and large-scaled structures and improvement of social safety against natural disasters.

Main Supervisor: Akira Hasegawa

